

# 硅 / 玻璃键合技术在 RF-MEMS 开关制作中的应用

王培森<sup>1</sup>, 于 映<sup>1</sup>, 罗仲梓<sup>2</sup>, 彭慧耀<sup>1</sup>

(1.福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350002;

2.厦门大学 萨本栋微机电研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 介绍了一种新的 RF-MEMS 开关制作工艺, 利用静电键合技术将表面微加工工艺与体硅加工工艺结合在一起完成开关上下电极的组合; 说明了如何在普通环境下进行图形对准; 通过静电力的理论计算和键合试验, 分析了铝台阶对硅 / 玻璃静电键合的影响, 得出铝台阶厚度低于 100 nm 时键合效果较好; 对有无铝台阶时的静电键合电流特性进行比较, 分析了硅 / 玻璃界面电荷分布及其运动情况, 为 RF-MEMS 开关的设计与制作提供了有意义的参考。

**关键词:** 硅 / 玻璃键合; 电流特性; 电荷分布; Al 台阶; RF-MEMS 开关

**中图分类号:** TN305 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2007) 01-0030-04

## Application of Si / Glass Bonding in the Factice of RF-MEMS Switches

WANG Pei-sen<sup>1</sup>, YU Ying<sup>1</sup>, LUO Zhong-zi<sup>2</sup>, PENG Hui-yao<sup>1</sup>

(1.Department of physics and information engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

2.Peng Tung Sah MEMS research center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Bulk micromachining processes and surface sacrificial processes were connected by Si / glass bonding for making RF-MEMS switches. How to align the mask at nomal condition was given. The theoretical calculations of the static force and lots of bonding experiments were done to prove the influence of Al in the Si / glass bonding, educing that better results of Al thickness below 100 nm. The current characteristic was compared in the electrostatic bonding with Al or not. The charge distribution and movement in the interface of silicon wafer and glass wafer was analyzed. Significant reference was provided for the design and manufacture of RF-MEMS switches.

**Key words:** Si / glass bonding; current characteristic; charge distribution; Al steps; RF-MEMS switches

## 1 引 言

RF-MEMS 开关与普通 GaAs、PIN 二极管及晶体管开关比较具有隔离度高、插入损耗低、能量消耗低等优良特性, 在微波通信集成电路中具有广泛

应用前景<sup>[1]</sup>。目前在 RF-MEMS 开关制作中普遍使用表面微加工工艺, 通过表面结构层和牺牲层的制备和腐蚀制作器件<sup>[2]</sup>。本文所介绍的是一种电容式 RF-MEMS 开关<sup>[3]</sup>, 其工艺流程如图 1 所示。其特点是悬臂梁在硅基上制作完成之后, 通过硅 / 玻

收稿日期: 2006-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60301006); 福建省科技重点项目资助 (2005H029)

玻璃键合将悬臂梁转移至玻璃上铝电极组合成器件。

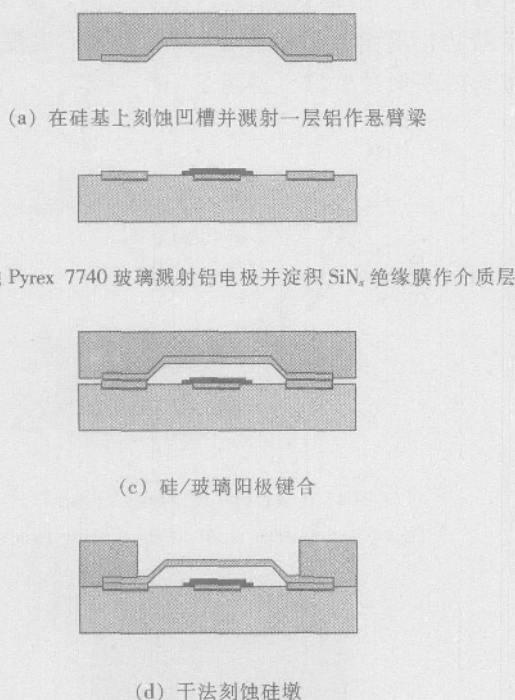


图1 RF-MEMS 开关工艺流程  
Fig.1 Processes of RF-MEMS switches

硅/玻璃键合使用热-静电键合的方法完成，其主要机理是<sup>[4]</sup>，一定温度下在键合片两端加电压，依靠静电力将硅与玻璃键合在一起。键合普遍使用 Pyrex 7740 玻璃，它的热膨胀系数与硅相似。在 300~400℃ 下加高压 700~1200 V，玻璃接负极，硅片接正极，玻璃中  $\text{Na}^+$  在电场力作用下向负极移动，和硅接触的玻璃表面留下负电荷  $\text{O}^-$ ，形成一空间负电荷区。该空间负电荷区与硅表面正电荷间强大的吸引力将硅片和玻璃拉在一起。同时硅玻璃

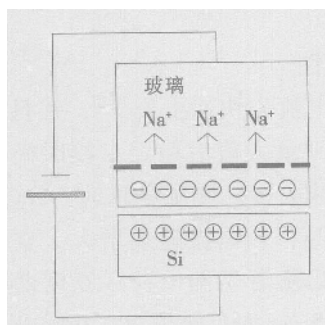


图2  $\text{Na}^+$  漂移及空间电荷区形成过程

Fig.2 The process of  $\text{Na}^+$  drifting and setting up of space charge

界面紧密接触，温度较高，在静电场作用下硅/玻璃界面发生电化学反应，产生共价键  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ，实现硅/玻璃的良好封接。 $\text{Na}^+$  漂移以及空间电荷区的形成过程如图 2 所示<sup>[5]</sup>。

## 2 试验

键合试验中使用 50 mm (100) 硅片，厚度为 300  $\mu\text{m}$ ，电阻率  $7 \sim 8 \Omega \cdot \text{cm}$ ；用膨胀系数为  $3.3 \times 10^{-7}/\text{K}$  的一种国产玻璃代替 Pyrex 7740 玻璃，其性能与 Pyrex 7740 相似，玻璃成分为 80.5%  $\text{SiO}_2$ ，12.9%  $\text{B}_2\text{O}_3$ ，2.2%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，0.4%  $\text{K}_2\text{O}$ ， $\text{Na}_2\text{O}$  3.8%。键合装置使用点电极键合，点电极通负高压接透明玻璃，这样可以直接观察键合变化过程。

### 2.1 键合前处理

如图 1 (c) 所示，为方便键合前图形对准，要求上下铝电极均高出键合平面一些。因此在硅/玻璃间出现了铝台阶，铝台阶的厚度对键合效果影响很大。因此键合试验时，在玻璃上键合一层铝电极图形，之后与清洗后硅片键合。铝电极厚度由 500 nm 开始调整，直至键合效果达到要求。

### 2.2 静电键合

(1) 将两键合片浸入去离子水中，取出后直接带着去离子水，在改装后的光刻机上进行图形对准，抽真空。

(2) 取出对准后键合片至键合台上。其间硅与玻璃不会相互移动，离子水的黏附性能将两键合片粘贴在一起。

(3) 开始缓慢升高温度至设定值。可以设定几个温度阶梯，使温度缓慢上升。

(4) 待温度达到预定值，加上高电压，此时可以清晰地看见键合过程，键合从中间点电极下方开始向边沿扩散。可以从电流表看到电流变化情况。待电流经过最大值之后减小为零时，缓慢降温至 250℃，撤去电压。

(5) 缓慢降温至 100℃，键合完成。缓慢升温降温，是为避免玻璃因温度变化过快引发断裂。

## 3 结果与讨论

### 3.1 键合环境

在洁净度不高的环境下，空气中的尘埃颗粒会

影响键合效果，在尘埃颗粒周围出现间隙，如图3所示。

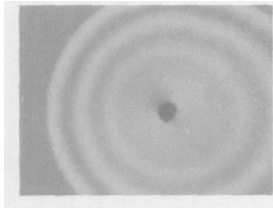


图3 显微镜下观察尘埃颗粒  
Fig.3 Dust under the microscope

真空环境下键合，可以避免尘埃颗粒的影响，但这对键合条件要求较高，不易实现。而且真空环境下，气压小，硅片与加热台间热阻增大，导热系数减小，使得键合速率变慢<sup>[2]</sup>。

为此在普通环境下键合时，需要在带去离子水情况下进行图形对准，这样可以保证对准后图形不轻易移动，同时避免空气中尘埃颗粒跑到键合片间，影响键合效果。为避免键合时大量去离子水蒸发引起气泡，移动已对准图形，还需要在对准图形后对键合片抽真空，减少去离子水。

### 3.2 金属台阶控制

静电键合主要依靠两键合片间静电力将键合片拉在一起，静电力的大小直接影响键合效果。

由电场理论知，静电力<sup>[6]</sup>

$$P = -\frac{\epsilon_0 V^2}{2} \left( \frac{G}{G X_0 + \epsilon_0 X_P} \right)^2$$

式中： $X_P$ 为玻璃空间电荷区宽度； $X_0$ 为键合片之间金属台阶厚度（空气缝隙宽度）； $G$ 、 $\epsilon_0$ 分别为玻璃及空气介电常数。

由上式可知，键合静电力的主要大小主要由玻璃空间电区宽度 $X_P$ ，空气缝隙宽度 $X_0$ 以及所加电压 $V$ 决定。 $X_P$ 为几个 $\mu m$ <sup>[2]</sup>，并随着所加电压升高而变窄。设定 $X_P=1 \mu m$ ，则 $P-X_0$ 关系如图4所示。

由图4可见，静电力随台阶厚度 $X_0$ 的增大而减小，因此金属台阶的厚度需在一定范围内才能实现硅与玻璃键合。另外，静电力随温度的升高、所加电压的增大而增大。

通过对不同铝台阶厚度，不同温度键合试验发现，台阶厚度低于100 nm时键合效果较好，如

图5(c)所示，图形完整，边沿清晰无缝隙。台阶厚度过高则键合温度不容易控制，温度低时，台阶边沿有缝隙，如图5(a)所示；温度过高则铝台阶图形被破坏，如图5(b)所示。

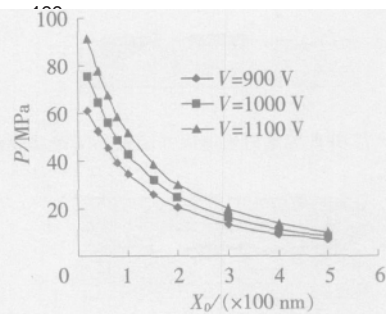
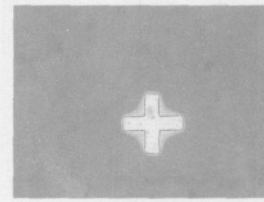
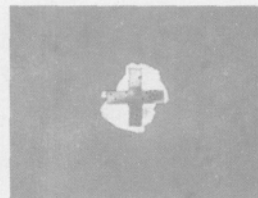


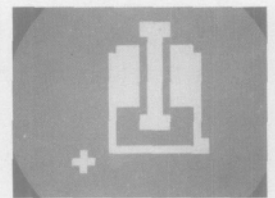
图4 金属台阶厚度对静电力影响  
Fig.4 The influence of Al to electrostatic force



(a) 380 °C Al 台阶厚 200 nm



(b) 400 °C Al 台阶厚 200 nm



(c) 380 °C Al 台阶厚 80 nm

图5 键合后显微镜下观察铝台阶图形（电压1000 V）

Fig.5 Al steps under bonding ( $V=1000 \text{ V}$ )

### 3.3 电流特性

键合时电流先快速上升<sup>[7]</sup>，并且上升速率逐渐变慢，达到最大值后稳定一段时间，之后缓慢下降，最后减为零。刚加电压时， $\text{Na}^+$ 在静电力作用下向负极漂移，电流逐渐增大，空间电荷区开始形成；之后随着空间电荷区宽度的增大，玻璃内部电场阻碍 $\text{Na}^+$ 向负极漂移，电流逐渐减小，直至玻璃内外电场达到平衡， $\text{Na}^+$ 停止向负极移动，空间电荷区宽度固定，电流减为零。



键合电流特性(玻璃直径为30 mm)如图6所示。有铝台阶时电流变化速率比没有铝台阶时慢,键合需要时间更长。刚加上电压时,硅片与玻璃靠近慢,玻璃上压降小, $\text{Na}^+$ 移动缓慢,外电路电流很小,所以在加上电压前一段时间,电流表无读数。之后随着硅与玻璃慢慢靠近,玻璃内电场强度增大, $\text{Na}^+$ 漂移速率增大,外电路电流变大。有金属台阶时,在金属台阶边沿,硅与玻璃不易产生形变,硅/玻璃间距变化缓慢,使得电流上升、下降的速率都比较慢。

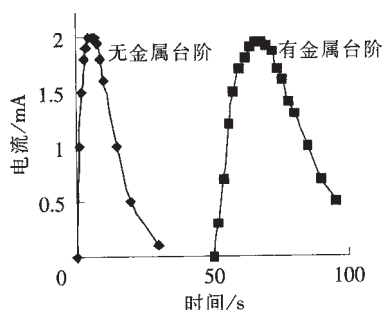


图6 静电键合电流特性

Fig.6 Current characteristic of anode bonding

### 3.4 硅/玻璃界面电荷分布

键合时 $\text{Na}^+$ 在静电场作用下向负极移动,在玻璃表面形成 $\text{O}^-$ 空间电荷区。 $\text{O}^-$ 在直流电压作用下会从玻璃表面被释放出来向硅表面移动<sup>[8]</sup>。同时,由于键合时空气间隙中所含有 $\text{H}_2\text{O}$ ,在直流电压下 $\text{H}_2\text{O}$ 被分解为 $\text{H}^+$ 和 $\text{OH}^-$ 或 $\text{O}^-$ 。在一定温度下,空气间隙中 $\text{H}_2\text{O}$ 分解所得 $\text{O}^-$ 和从玻璃表面释放出的 $\text{O}^-$ 在硅表面与 $\text{Si}$ 反应,形成 $\text{Si}-\text{O}$ 共价键。 $\text{Si}-\text{O}$ 强度比 $\text{Si}-\text{Si}$ 键强,其强度是 $\text{Si}-\text{Si}$ 键的2.5倍,使得键合界面紧密封接。

空气间隙中 $\text{H}_2\text{O}$ 分解所得 $\text{H}^+$ 在电场力作用下,从玻璃表面向玻璃内部移动,在玻璃 $\text{O}^-$ 空间电荷区靠近阴极处形成 $\text{H}^+$ 空间电荷层。

因此,空间电荷区由两部分组成,一是由 $\text{Na}^+$ 向阴极漂移而形成 $\text{O}^-$ 空间电荷区,二是空气间隙 $\text{H}_2\text{O}$ 分解所得 $\text{H}^+$ 漂移而形成 $\text{H}^+$ 空间电荷区。空间电荷区的宽度随所加电压的增大、温度的升高而增大,并且键合时间越长空间电荷区宽度越大<sup>[9]</sup>。但空间电荷区 $\text{O}^-$ 部分形成与 $\text{H}^+$ 空间电荷层形成需

要时间相比要短得多,而且 $\text{H}^+$ 空间电荷层宽度很小,可以忽略。所以,键合效果与时间关系不大,主要受温度、所加电压、键合片前处理以及金属台阶厚度影响。

## 4 结 论

硅/玻璃静电键合时,键合环境、所加电压大小和硅/玻璃间金属台阶厚度是影响键合效果的几个主要因素,直接关系到键合的好坏。在普通环境,洁净度不高时,应带去离子水进行预键合,完成图形对准,避免空气中颗粒影响键合效果。铝台阶厚度不超过100 nm时键合效果较好,铝台阶边沿无缝隙,硅/玻璃结合严密,金属图形完好无破坏。有金属台阶与无金属台阶时硅/玻璃静电键合电流特性有所不同,有金属台阶时,电流变化速率较慢,键合需要更长时间。玻璃上空间电荷区由两部分组成,靠近玻璃表面是较宽的 $\text{O}^-$ 空间电荷区,离玻璃表面较远,与 $\text{O}^-$ 空间电荷区相连的是一层 $\text{H}^+$ 空间电荷层。

### 参考文献:

- [1] REBEIZ G M. RF MEMS理论设计技术 [M]. 黄庆安, 廖小平译. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [2] 王阳元, 武国英. 硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究 [J]. 电子学报, 2002, 30 (11): 1-8.
- [3] 孙建海, 崔大付. 宽带 RF-MEMS 开关驱动电压的分析研究 [J]. 微纳电子技术, 2004, 41 (9): 37.
- [4] 李太和, 李晔辰. 硅片键合技术的研究进展 [J]. 传感器世界, 2002 (9): 6-9.
- [5] LEE D J, JU B K. Effects of a hydrophilic surface in anodic bonding [J]. J Micromech Microeng, 1999, 9 (4): 313-318.
- [6] 王蔚, 陈伟平. MEMS 中的静电-热键合技术 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (1): 134-136.
- [7] 董欣, 吴苗. 硅-玻璃静电键合中的电流-时间特性分析 [J]. 传感器技术, 2001, 20 (3): 48-50.
- [8] CARSON D E, HANG K W, STOCKDALE G F. Electrode polarization in alkali-containing glasses [J]. J Am Ceram Soc, 1972, 55 (7): 337-341.
- [9] XING Q F, YOSHIDA M. TEM study of the interface of anodic-bonded Si/glass [J]. Scripta Materialia, 2002, 47: 577-582.

### 作者简介:

王培森 (1982—), 男, 在读硕士研究生, 从事 MEMS 制作工艺研究。